

# 冻融环境下煤矸石混凝土损伤演化规律研究

邱继生, 潘 杜, 关 琥, 谷拴成, 郑娟娟, 张程华

(西安科技大学 建筑与土木工程学院, 陕西 西安, 710054)

**摘要:** 为研究煤矸石混凝土的抗冻性能, 试验按照 0%、20%、40%、60% 的煤矸石取代率制备混凝土, 探索研究不同取代率的煤矸石混凝土在冻融环境下的表现形貌、质量、相对动弹性模量和抗压强度的变化规律; 并根据煤矸石混凝土在不同冻融循环作用下的动弹性模量的变化, 建立煤矸石混凝土的损伤演化方程。研究表明: 煤矸石取代率为 0%、20%、40% 和 60% 的混凝土, 分别在冻融循环 300 次、65 次、55 次和 25 次破坏。随着煤矸石取代率的增加, 混凝土的抗冻性能明显降低; 煤矸石混凝土的损伤演化方程与试验数据符合较好, 可以为冻融环境下煤矸石混凝土的耐久性设计提供理论依据。

**关键词:** 煤矸石混凝土; 抗冻性能; 相对动弹性模量; 损伤演化方程

**中图分类号:**

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1006-7930(2017)05-0654-06

## Study on damage evolution law of coal gangue concrete amidst the freezing-thawing environment

QIU Jisheng, PAN Du, GUAN Xiao, GU Shuancheng, ZHENG Juanjuan, ZHANG Chenghua

(School of Architecture and Civil Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract:** To study the frost resistance of coal gangue concrete, the concrete was prepared according to 0%, 20%, 40% and 60% substitution rate of coal gangue. The rule of different coal gangue substitution rate on the surface appearance, the mass, the dynamic elastic modulus and compressive strength by the action of freeze-thaw cycles were researched. According to the change of the dynamic elastic modulus of coal gangue concrete under different freeze-thaw cycles, the damage evolution equation of coal gangue concrete was established. The results show that the coal gangue substitution rate of 0%, 20%, 40% and 60% of the concrete, freeze-thaw damage occurred 300 times, 65 times, 55 times and 25 times respectively. With the increase of the replacement rate of coal gangue, the frost resistance of concrete obviously decreased. It is also shown that the damage evolution equation of coal gangue concrete coincide well with the test data, which can provide theoretical basis for the durability design of coal gangue concrete in freeze-thaw environment.

**Key words:** coal gangue concrete; frost resistance; relative dynamic elastic modulus; damage evolution equation

煤矸石是一种产生于煤炭的开采和洗选过程中的伴生矿物。我国的煤矸石年产量多达 6.2 亿 t, 约占全国工业固废产生量的 40%<sup>[1]</sup>, 是我国积存量和年产量最大、占用堆积场地最多的一种工业废弃物。若不加以利用, 不仅占用土地、破坏生态环境, 而且还会造成土体、水体污染<sup>[2-6]</sup>。

许多学者已经在寻求煤矸石的综合利用途径<sup>[7-9]</sup>, 其中将煤矸石作为粗集料, 制成新的混凝土不仅能够解决煤矸石大量积存问题, 而且还在自重、温度裂缝及保温性方面均优于普通混凝土<sup>[10]</sup>。近年来, 对煤矸石混凝土的研究也越来越多。陈彦文等<sup>[11]</sup>研究了煤矸石掺量对混凝土动弹性模量的影响, 并建立了煤矸石混凝土动弹性模量计算的数学模型; 赵振清等<sup>[12]</sup>研究了煤矸石混

凝土的力学性能和收缩性能, 并得出随着煤矸石掺量的增加, 混凝土的力学性能明显下降, 收缩性先增大后减小的结论; 朱泽忠等<sup>[13]</sup>运用正交试验方法确定了 C30 煤矸石混凝土的最佳配合比, 并得出煤矸石混凝土的适配强度为 C30 以下的结论; 高文志等<sup>[14]</sup>将煤矸石表面用水泥浆包裹, 制作不同等级的煤矸石混凝土以提高其抗压强度。

然而, 在对煤矸石混凝土结构的研究中, 学者们主要偏重考虑安全性能和使用性能, 对冻融环境作用造成的材料和结构耐久性损伤认识不足。因此, 对煤矸石混凝土构件的抗冻性及其在冻融环境作用下损伤演化规律的研究显得尤为必要。本文针对不同掺量的煤矸石混凝土, 通过快速冻融试验, 从宏观上研究了不同冻融循环次数

收稿日期: 2016-11-07

修改稿日期: 2017-08-21

基金项目: 陕西省教育厅自然科学基金专项(2013JK0969)

第一作者: 邱继生(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事绿色生态建筑材料力学性能及耐久性研究。E-mail: 358896111@qq.com

下煤矸石混凝土的表观形貌、质量损失率、相对动弹性模量和抗压强度变化的规律，并提出了冻融循环作用下煤矸石混凝土的损伤演化方程，为冻融环境下煤矸石混凝土耐久性设计及研究提供参考。

1 试验概况

1.1 原材料和配合比

水泥：选用陕西秦岭水泥股份有限公司 P · O42.5R 普通硅酸盐水泥。煤矸石：选用新世纪

矿务局红炭山煤矿所产的煤矸石，最大粒径 25 mm。石子：选用粒径为 5~16 mm 混合级配普通碎石。砂子：选用河砂，细度模数 2.7，堆积密度 1 460 kg/m<sup>3</sup>。外加剂：选用复合外加剂。水：选用普通自来水。

本次试验中，煤矸石混凝土的水胶比为 0.53，煤矸石取代率分别为 0%、20%、40% 和 60%。试验配合比如表 1 所示。其中 C1、C1M2、C1M4、C1M6 分别表示煤矸石取代率为 0%、20%、40%、60% 的混凝土。

表 1 煤矸石混凝土的配合比  
Tab. 1 Proportion of mixture about coal gangue concrete

编号	水泥/kg · m <sup>-3</sup>	水灰比	石子/kg · m <sup>-3</sup>	煤矸石/kg · m <sup>-3</sup>	水/kg · m <sup>-3</sup>	砂子/kg · m <sup>-3</sup>	外加剂/%
C1	300	0.53	1240	0	160	700	0.6
C1M2	300	0.53	990	182	160	700	0.6
C1M4	300	0.53	744	364	160	700	0.6
C1M6	300	0.53	496	545	160	700	0.6

1.3 试件制作及分组

煤矸石混凝土试件的制作及分组情况如表 2 所示。其中：a 表示尺寸为 100 mm × 100 mm × 300 mm 棱柱体，b 表示尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm 立方体。

1.2 试验方案

煤矸石混凝土冻融试验依据《普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》<sup>[15]</sup> 进行。试件标准养护 24 d 后，再放入水中浸泡 4 d，在第 28 d 进行快速冻融试验。质量损失、相对动弹性模量试验采用尺寸为 100 mm × 100 mm × 300 mm 棱柱体；抗压强度试验采用尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm 立方体。

表 2 试件制作及分组  
Tab. 2 Specimen making and grouping

组别	a/个	b/个
C1	15	30
C1M2	15	30
C1M4	15	30
C1M6	15	30

1.4 试验装置

煤矸石混凝土的冻融试验采用北京数智意隆仪器有限公司生产的 KDR-V9 系列混凝土快速冻融试验机；煤矸石混凝土质量测量采用常熟市天量仪器有限公司生产的 LT20 kg 电子天平；煤矸石混凝土的强度测量采用绍兴市肯特电子机械有限公司

生产的 YES-2000B 型数显式压力试验机；煤矸石混凝土的动弹性模量测量采用北京康科瑞有限公司生产的非金属超声检测分析仪(NM-4B)。

2 试验结果与分析

2.1 表观形貌

在整个冻融循环过程中，随着冻融次数的增加，煤矸石混凝土的表观形貌可以概括为 4 个阶段。第 1 阶段，煤矸石混凝土表观完好无损，如图 1(a)所示；第 2 阶段，煤矸石混凝土表面砂浆开始剥落，形成少量的坑蚀，如图 1(b)所示；第 3 阶段，煤矸石混凝土表面的砂浆开始大量剥落，坑蚀进一步加深、加重，骨料开始外露，如图 1(c)所示；第 4 阶段，随着表面砂浆的脱落，最终使煤矸石混凝土粗骨料暴露，并产生无规则的微裂缝，如图 1(d)所示。

2.2 质量损失

煤矸石混凝土冻融循环后的质量损失率的变化规律如图 2 所示。

由图 2 可知质量损失率受煤矸石取代率的影响非常大，C1 组在冻融循环 300 次后质量损失率仅 5%；而 C1M6 组在冻融循环 25 次后，质量损失率就已经超过 5%；并且随着冻融循环次数的增加，煤矸石混凝土的质量损失率整体呈上升趋势。这说明煤矸石对混凝土的抗冻性起控制性的作用，煤矸石的加入加速了混凝土表面砂浆的剥落，使质量损失更加明显。由此可见，在潮湿高寒地区使用

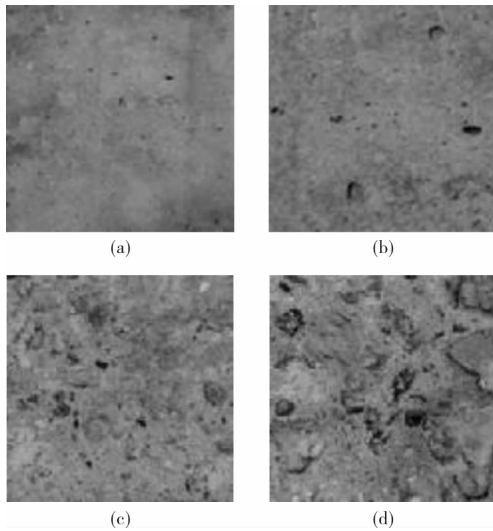


图 1 混凝土表面形貌

Fig. 1 The concrete apparent morphology

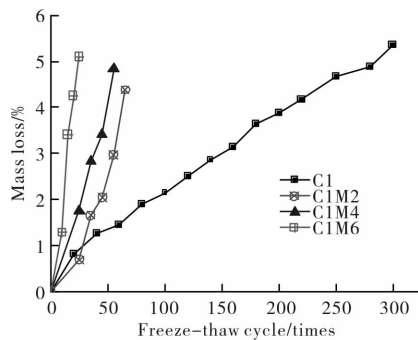


图 2 质量损失

Fig. 2 Mass loss

煤矸石混凝土, 会大幅度缩短混凝土的寿命。

### 2.3 相对动弹性模量

在冻融环境下, 煤矸石混凝土的相对动弹性模量变化规律如图 3 所示。由图 3 可以看出 C1 组在冻融循环 300 次后, 相对动弹性模量降至 0.79, 而 C1M4 组在冻融循环 50 次后相对动弹性模量便已经降到 0.6 以下, C1M2 组和 C1M6 组的相对动弹性模量也下降的非常快。这主要是由于煤矸石使得混凝土内部有更多的裂纹和缝隙, 在外部水压力的作用下水很快渗入, 而水在结冰后体积膨胀率可达 9%, 在膨胀压力和渗透压力共同作用下加剧了混凝土裂缝的扩展与连通, 同时出现新的微裂缝。随着冻融循环次数的增加, 混凝土中微裂缝的数量和宽度增多和增大, 内部破坏更加严重, 相对动弹性模量随之急剧下降。

### 2.4 抗压强度

在冻融环境下, 煤矸石混凝土抗压强度的变化规律如图 4 所示。

由图 4 可以看出, 煤矸石混凝土的抗压强度随着煤矸石取代率的增加而逐渐减小。这主要是因为

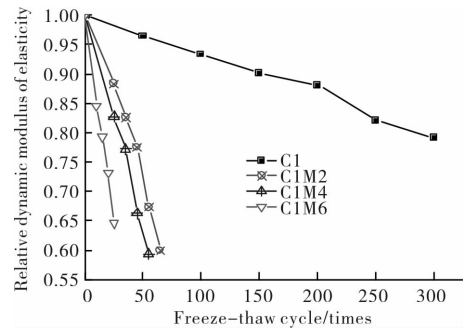


图 3 相对动弹性模量的损失

Fig. 3 The loss of relative dynamic elastic modulus

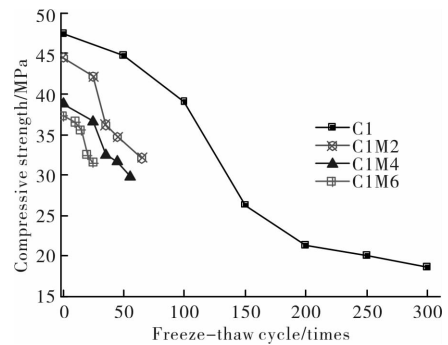


图 4 抗压强度

Fig. 4 The compressive strength

煤矸石的强度本身就比普通碎石骨料低。其次, 煤矸石混凝土的密实度也比普通混凝土差, 而密实度又是影响混凝土强度的重要因素。此外, 随着冻融循环次数的增加, 煤矸石混凝土的强度均普遍下降。这是由于随着冻融循环次数的增加, 冻胀应力使得煤矸石混凝土内部裂缝逐渐加深甚至贯通, 致使煤矸石混凝土的抗压强度普遍降低。

## 3 煤矸石混凝土冻融损伤演化方程的建立

混凝土材料在一定程度上都属于有空隙的材料, 一些原始的细微缺陷不可避免地广泛分布于材料之中。煤矸石混凝土经受冻融循环作用后, 无可避免地会在其中产生大量的微裂缝, 这些裂缝随着冻融次数的增加还会不断扩展, 发展到一定程度时会使材料受力性能降低<sup>[16]</sup>。因此, 以煤矸石混凝土在不同冻融循环作用后的动弹性模量的变化, 建立相应的冻融宏观损伤演化方程, 探讨不同取代率的煤矸石混凝土在冻融环境作用下的宏观损伤演化规律。

### 3.1 煤矸石混凝土冻融损伤演化方程的基本形式

根据宏观唯象损伤力学的理论, 煤矸石混凝土冻融损伤变量  $D$  可定义为

$$D(n) = 1 - \frac{E(n)}{E_0} \quad (1)$$

式中:  $D(n)$  为煤矸石混凝土经历不同冻融循环次数后的损伤;  $E(n)$  为煤矸石混凝土经历不同冻融循环次数后的动弹性模量;  $E_0$  为煤矸石混凝土未经历冻

融循环时的动弹性模量;  $n$  为冻融循环次数。  
根据试验结果, 计算煤矸石混凝土在不同冻融循环次数后的损伤值如表 3 所示。

表 3 不同冻融循环次数下的煤矸石混凝土的损伤值  
Tab. 3 Damage of coal gangue concrete under different freeze - thaw cycles

C1		C1M2		C1M4		C1M6	
冻融循环次数	损伤值	冻融循环次数	损伤值	冻融循环次数	损伤值	冻融循环次数	损伤值
0	0	0	0	0	0	0	0
50	0.036	25	0.117	25	0.173	10	0.155
100	0.067	35	0.174	35	0.228	15	0.207
200	0.135	45	0.225	45	0.337	20	0.268
300	0.209	65	0.401	55	0.407	25	0.354

将 C1 组, C1M2 组, C1M4 组损伤变量值绘于图 5, 并对试验数据进行拟合。

拟合得到各组的冻融损伤演化方程:

$$D(n)=a \cdot n^b \tag{2}$$

式中,  $a, b$  为待定系数,  $n$  为冻循环次数, 各组拟合参数如表 4 所示。

3.2 煤矸石混凝土冻融损伤演化方程修正系数的确定

进一步考虑取代率对煤矸石混凝土冻融损伤的影响, 建立煤矸石混凝土冻融损伤演化方程的一般形式:

$$D(n)=K_1 \cdot a \cdot n^{b \cdot K_2} \tag{3}$$

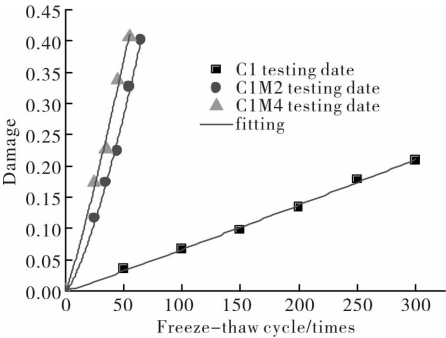


图 5 冻融损伤拟合曲线  
Fig. 5 Freeze-thaw damage fitting

表 4 拟合参数

Tab. 4 Fitting parameters

组别	$a$	$b$	$R^2$
C1	$5.347 \times 10^{-4}$	1.048	0.996
C1M2	$1.34 \times 10^{-3}$	1.366	0.989
C1M4	$4.09 \times 10^{-3}$	1.15	0.980

通过对煤矸石取代率  $f=0\%$ ,  $20\%$ ,  $40\%$ , 时, 不同冻融循环次数下的损伤值进行以  $f=0\%$  时的损伤为标准的归一化处理. 经回归计算得不同取代率煤矸石混凝土修正系数  $K_1$ 、 $K_2$  与煤矸石取代率的关系为

$$K_1=1\,872.414e^{(-7.507+3.765f+3.147f^2)}, (R^2=0.974) \tag{4}$$

$$K_2=1+3.662f-12.899f^2+10.887f^3, (R^2=0.988) \tag{5}$$

根据以上分析, 可以得到综合考虑煤矸石取代率的冻融损伤演化方程:

$$D(n)=e^{(-7.507+3.765f+3.147f^2)} \times n^{(1.048+3.838fs-13.518f^2+11.41f^3)} \tag{6}$$

式中:  $D(n)$  为煤矸石混凝土经历不同冻融循环次数后的损伤;  $f$  为煤矸石混凝土中煤矸石的取代率;  $n$  为冻融循环次数。

3.3 煤矸石混凝土冻融损伤演化方程的验证

煤矸石取代率为  $60\%$  的混凝土, 在冻融循环作用下损伤试验值与损伤演化方程计算值的比值如表 5 所示。

综合表 5 和图 6 可以看出, 冻融损伤演化方程的计算结果与试验结果符合较好。

表 5 冻融损伤试验值与损伤演化方程计算值的比值

Tab. 5 The ratio of the freeze-thaw test damage value to the evolution equation damage value

组别	损伤值	冻融循环次数				
		0	10	15	20	25
C1M6	试验值	0	0.155	0.207	0.268	0.354
	计算值	0	0.145	0.213	0.280	0.345
	试验值/计算值	—	1.07	0.97	0.96	1.02

C1M6 组冻融损伤试验值与演化方程计算值比值的均值为 1.01, 标准差为 0.044. C1M6 组冻融损伤试验值与演化方程计算值的对比如图 6 所示。

4 结论

(1) 试验研究表明, 在冻融环境下, 随着煤矸石取代率的增加, 混凝土的抗冻性能逐渐降低. 主要表现为表观破坏更加明显, 质量损失更加显著,

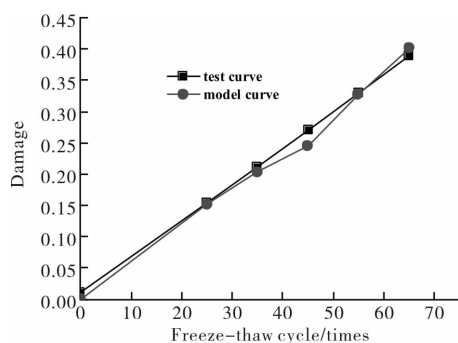


图6 试验值与计算值对比

Fig. 6 The test values compared with calculated value

动弹性模量更小,抗压强度更低。

(2)试验数据表明,普通混凝土可以冻融循环300次,而煤矸石取代率为60%的混凝土仅冻融循环25次就破坏。因此,在寒冷潮湿地区,使用煤矸石取代碎石制备混凝土,会严重缩短混凝土寿命。

(3)根据宏观唯象损伤力学理论,以试验数据为依据,建立的损伤演化方程与试验数据符合较好,能够表征冻融环境下不同取代率的煤矸石混凝土的损伤演化过程。

## 参考文献 References

- [1] 李平,全国人大代表王明胜建议应加大低热值煤炭发电项目核准力度[EB/OL]. [http://www.mlr.gov.cn/xwdt/jrxw/201403/t20140311\\_1306488.htm](http://www.mlr.gov.cn/xwdt/jrxw/201403/t20140311_1306488.htm), 2014-03-11.  
LI Ping, National People's Congress WANG Mingsheng suggested increasing the low calorific value coal power project approval [EB/OL]. [http://www.mlr.gov.cn/xwdt/jrxw/201403/t20140311\\_1306488.htm](http://www.mlr.gov.cn/xwdt/jrxw/201403/t20140311_1306488.htm), 2014-03-11.
- [2] 陈建平. 煤矸石对矿区环境污染及其防治[J]. 能源与环境, 2006(3): 66-67.  
CHEN Jianping. Environmental pollution and prevention of coal gangue in mining area [J]. Energy and Environment, 2006(3): 66-67.
- [3] 刘迪. 煤矸石的环境危害及综合利用研究[J]. 气象与环境学报, 2006(3): 60-62.  
LIU Di. Environmental hazards and comprehensive utilization of coal gangue [J]. Journal of Meteorology and Environment, 2006(3): 60-62.
- [4] 樊金拴. 煤矸石对环境的危害与开发利用研究[J]. 资源开发与市场, 2008(1): 56-59.  
FAN Jinshuan. Study on the harmfulness of coal gangue to environment and its exploitation [J]. Resource Development and Market, 2008(1): 56-59.
- [5] 王新伟,钟宁宁,韩习运. 煤矸石堆放对土壤环境PAHs污染的影响[J]. 环境科学学报, 2013(11): 3092-3100.  
WANG Xinwei, ZHONG Ningning, HAN Xiyun. Impacts of coal gangue stockpiling on polycyclic aromatic hydrocarbons pollution in soil environment [J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2013(11): 3092-3100.
- [6] 马骏,郁钟铭,舒仕海,等. 煤矸石对矿区的环境危害及治理措施[J]. 煤炭工程, 2015(10): 70-73.  
MA Jun, YU Zhongming, SHU Shihai, et al. Environmental damage of coal gangue to mining area and its control measures [J]. Coal Engineering, 2015(10): 70-73.
- [7] 郭彦霞,张圆圆,程芳琴. 煤矸石综合利用的产业化及其展望[J]. 化工学报, 2014(7): 2443-2453.  
GUO Yanxia, ZHANG Yuanyuan, CHENG Fangqin. The industrialization and prospect of the comprehensive utilization of coal gangue [J]. Journal of Chemical Industry, 2014(7): 2443-2453.
- [8] 关杰,李英顺. 煤矸石综合利用现状及前景[J]. 环境与可持续发展, 2008(1): 34-36.  
GUAN Jie, LI Yingshun. Current situation and prospect of coal gangue comprehensive utilization [J]. Environment and Sustainable Development, 2008(1): 34-36.
- [9] 郭建秋. 我国煤矸石综合利用现状及前景展望[J]. 环境与发展, 2014(3): 102-104.  
GUO Jianqiu. Current situation and prospect of coal gangue comprehensive utilization in China [J]. Environment and Development, 2014(3): 102-104.
- [10] 张凯峰,吴雄,杨文. 煤矸石建材资源化的研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(21): 290-293.  
ZHANG Kaifeng, WU Xiong, YANG Wen. Research progress of utilizing coal gangue as resource building materials [J]. Materials Review, 2013, 27(21): 290-293.
- [11] 陈彦文,牛晚扬,丁兆阳. 煤矸石混凝土弹性模量的试验研究[J]. 混凝土, 2016(4): 20-23.  
CHEN Yanwen, NIU Wanyang, DING Zhao-yang. Research on elasticity modulus of coal gangue concrete [J]. Concrete, 2016(4): 20-23.
- [12] 赵振清. 掺煤矸石混凝土力学及收缩性能研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学, 2015.  
ZHAO Zhenqing. Study mixing coal gangue concrete with dynamics and shrinkage [D]. Shenyang: Shenyang Architecture University, 2015.
- [13] 朱泽忠. 煤矸石混凝土的研制及其性能测试[D]. 安徽:安徽理工大学, 2014.  
ZHU Zezhong. Coal gangue concrete development and performance testing [D]. Anhui: Anhui University of Science and Technology, 2014.
- [14] 高文志. 煤矸石表面处理后做混凝土骨料的研究[D]. 安徽:安徽理工大学, 2015.  
GAO Wenzhi. Research on coal gangue after surface treatment as concrete aggregates [D]. Anhui: Anhui University of Science and Technology, 2015.
- [15] 普通混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准: GB/T50082-2009[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2009.  
Long term performance and durability of ordinary concrete test method standards: GB/T50082-2009 [S]. Beijing: China Building Industry Press, 2009.
- [16] 肖前慧. 冻融环境多因素耦合作用混凝土结构耐久性研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2010.  
XIAO Qianhui. Concrete structures durability in freezing-thawing circumstance based on multifactor effects [D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture & Technology, 2010.

(编辑 沈波)